

Różnice w wynikach analiz uziarnienia przeprowadzonych różnymi metodami

Differences in results of grain-size analysis made by various methods

Dominik Płoskonka*

*Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania, Polska Akademia Nauk,
ul. św. Jana 22, 31-018 Kraków*

Zarys treści: W naukach o ziemi do badania wielkości cząstek osadu używa się wielu różnych metod. Do najpopularniejszych należą metody sitowe, metoda areometryczna i metoda dyfrakcji laserowej. Każda z nich opiera się na wykorzystaniu innych wartości fizycznych, przez co, za ich pomocą, analizując te same utwory otrzymuje się różne wyniki. W pracy przedstawiono wyliczone równania mogące służyć do przeliczania pomiędzy sobą wyników metod sitowych między sobą oraz z metodą areometryczną i dyfrakcji laserowej.

Słowa kluczowe: analiza uziarnienia, porównanie metod, metoda sitowa, metoda dyfrakcji laserowej, metoda areometryczna

Abstract: In the Earth science there are lots of various methods to measure grain size. The sieve method (wet and dry), the areometric method and the laser diffraction method are the most popular among methods applied in grain size analysis. Each of them use other physical parameter, that's why results of analysis of the same sample of sediments differ. This paper presents calculated equations which can be used to convert results of the sieve methods with the areometric method and the laser diffraction method.

Key words: grain size analysis, comparison of methods, sieve method, laser diffraction method, aerometric method

Wstęp

Analiza uziarnienia jest jedną z podstawowych analiz w naukach o Ziemi. Wykorzystuje się ją do charakterystyki osadów oraz gleb. Na jej podstawie można wnioskować o cechach paleośrodowiska, w którym powstał osad oraz o jego właściwościach fizycznych i chemicznych. Ponad czterysta znanych obecnie metod i ich wariantów analizy

uziarnienia dzieli się na cztery duże grupy: grupę metod sitowych, mikroskopowych, grawitacyjnych i elektronicznych. Każda z metod jest najskuteczniejsza w określonym zakresie pomiarowym powyżej lub poniżej którego wyniki będą obarczone zbyt dużym błędem, lub będzie ich w ogóle brak. Dla frakcji piasku za najlepszą uważa się metodę sitową, zaś dla frakcji drobniejszych stosuje się metody sedymentacyjne (Myślińska, 1998). W

* e-mail: ploskonka@zg.pan.krakow.pl

Polsce najpopularniejsza jest metoda areometryczna Casagrande'a, na zachodzie Europy – metoda pipetowa. Tradycyjne metody analiz granulometrycznych są powoli wypierane przez, coraz popularniejsze, metody elektroniczne, szczególnie przez metodę dyfrakcji laserowej (nazywaną również krócej metodą laserową).

Każda z metod opiera się na pomiarze określonej wartości fizycznej, zaś na podstawie tego pomiaru wnioskuje się o wielkościach cząstek tworzących analizowany utwór, dlatego pomiar takich samych osadów różnymi metodami na ogół daje nieco inne wyniki. Dodatkowy wpływ na końcowy wynik ma również sposób przygotowania próbki do analizy (Seul, 2007). Duża liczba różnych metod może stwarzać problemy w porównywaniu wyników uzyskanych za ich pomocą. Z tego powodu należy być bardzo ostrożnym przy porównywaniu ze sobą bezpośrednio wyników analiz uzyskanych przy pomocy różnych metod, oraz należy zawsze dokładnie opisać sposób przeprowadzenia badania.

Zarówno w Polsce, jak i na świecie powstały prace zajmujące się różnicami w wynikach analizy granulometrycznej uzyskanych przy pomocy odmiennych metod. Znaczna ich część skupia się na porównaniu efektów tradycyjnych metod sedymentacyjnych (areometryczna lub pipetowa) z nowymi metodami elektronicznymi (dyfrakcji laserowej, IPS; np. Kasza, 1992; Issmer, 2000; Dębicki i in., 2002; Ryżak i in., 2004; Ramaswamy, Rao, 2006; Płoskonka, 2009). Mniej uwagi w literaturze poświęcono porównaniu metody sitowej z innymi metodami. Zagadnienie przekształcania danych granulometrycznych uzyskanych na drodze pomiarów mikroskopowych na dane odpowiadające efektom analizy sitowej podjął Merta (1991). Nicieja (1996) porównała metodę pipetową, areometryczną, kombinowaną, laserową i sitową na mokro dość szeroko omawiając same metody i różnice w wynikach. Różnice w wynikach metody dyfrakcji laserowej oraz metody pipetowej i sitowej zostały szczegółowo opisane w literaturze anglojęzycznej (Loizeau i in., 1994; Buuraman i in., 1997; Kornet i Vandenberghe, 1997).

Celem pracy jest przedstawienie zróżnicowania wyników analizy uziarnienia w zależności od zastosowanej metody i możliwości łączenia wyników uzyskanych różnymi metodami. Podstawą opisywanych badań jest porównanie ze sobą wyników analizy sitowej na mokro i sitowej na sucho oraz porównanie ich z wynikami metody areometrycznej Casagrande'a w modyfikacji Prószyńskiego i metody dyfrakcji laserowej (wykonanej laserowym miernikiem cząstek Analysette 22 firmy Fritsch).

Analizy wykonano dla tych samych próbek. W efekcie opracowano równania pomocne przy przeliczaniu między sobą wyników analizy uziarnienia uzyskanych przy pomocy opisywanych metod. Badania wykonano w trakcie studiów w Instytucie Geografii i Gospodarki Przestrzennej, Uniwersytecie Jagiellońskiego w Krakowie.

Metody zastosowane w badaniach

Metoda sitowa występuje w dwóch wariantach – na sucho i na mokro. Dokładny opis procesu przesiewania można znaleźć w pracy Sztaby (1993). Celem procesu przesiewania jest podział materiału uziarnionego na klasy ziarnowe o założonych granicach. Odbywa się to przez przesiewanie na zestawie sit o ściśle określonych wielkościach otworów. Wielkością ograniczającą przejście ziarna przez sito jest szerokość ziarna. Bardzo ważnym czynnikiem mającym wpływ na przesiewanie jest wilgotność materiału. Przesiewanie jest efektywne w dwóch skrajnych przypadkach, gdy ziarna są suche (wtedy przesiewamy na sucho), lub gdy są mokre w takim stopniu, że nadmiar wody grawitacyjnej ułatwia przesiewanie (wtedy przesiewamy na mokro). Jeżeli ziarna są wilgotne, efektywność procesu drastycznie spada. Granice pomiędzy tymi trzema stanami są płynne i zależą od wielu czynników, choć w praktyce laboratoryjnej nie ma problemów z ich rozróżnieniem. Podczas procesu przesiewania zakłada się, że nie ma ucieczki ziaren poza sita oraz, że wszystkie mniejsze ziarna zostały przesiane, a większe pozostały na sicie (brak ziaren trudnych). W praktyce nigdy nie daje się spełnić tego założenia w 100 %.

Metoda areometryczna jest jedną z grupy metod sedymentacyjnych. Opis założeń tych metod można znaleźć m. in. w pracach Myślińskiej (1998) lub Kordka (2002). Podstawą obliczeń jest prawo G. G. Stokesa zakładające, że prędkość swobodnego opadania w cieczy cząstek kulistych zależy wprost proporcjonalnie od kwadratu ich średnicy, przy wzięciu pod uwagę lepkości cieczy, gęstości cząstek i cieczy oraz przyspieszenia ziemskiego. W metodzie areometrycznej mierzona jest gęstość zawiesiny badanego utworu w określonych odstępach czasowych od początku sedymentacji. Z czasem coraz mniejsze cząstki opadają na dno, zmniejszając gęstość zawiesiny. Wynik analizy otrzymywany jest w procentach wagowych. Graniczne średnice frakcji są średnicami zastępczymi odpowiadającymi średnicą kul, które opadałyby z taką samą prędkością jak mierzone cząstki. W omawianej metodzie przyjęto następujące założenie

nia: cząstki powinny opadać laminarnie, wartości temperatury ośrodka i przyspieszenia ziemskiego powinny być stałe, wszystkie cząstki powinny być kulami o stałej gęstości (przyjmuje się gęstość kwarcu równą $2,65 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$), cząstki nie powinny oddziaływać ze sobą i ze ściankami naczynia.

Metoda dyfrakcji laserowej (laserowa) opiera się na dwóch fizycznych zjawiskach: dyfrakcji i interferencji fal świetlnych, których zastosowanie w dyfraktometrach laserowych przybliży Kordek (2002). Zjawisko dyfrakcji zachodzi, gdy fala świetlna przechodzi przez szczelinę lub omija obiekt stając się źródłem promieniście rozchodzących się fal świetlnych, które ze sobą interferują. Interferencja jest to tworzenie się fal wypadkowych po przecięciu się fal składowych. W dyfraktometrach laserowych fale składowe mają identyczne amplitudy i w zależności od kąta przecięcia następuje naprzemienne całkowite wygaszanie fali i wzmacnianie jej, dając na czujniku położonym za obiektem naprzemienne jasne i ciemne prążki. Wynik otrzymany jest w procentach objętościowych. Graniczne średnice frakcji są to średnice zastępcze – średnice kul, przy pomocy których powstałby taki sam obraz dyfrakcyjny jak w przypadku badanych cząstek. Komputer dokonuje przebiegów rejestrowanych impulsów na wyniki przy pomocy jednej z dwóch teorii fizycznych (Miego lub Fraunhofera). Metoda jest łatwa i szybka (jeden pomiar trwa ok. 20 minut). Ilość osadu potrzebnego do analizy wynosi ok. 1 g – co jest korzystne w przypadku małej ilości materiału, może się również okazać problemem, gdyż tak małe próbki często nie są reprezentatywne dla całego osadu, co może powodować znaczne różnice w wynikach. Metoda zakłada, że wszystkie cząstki są kulami, układają się losowo w zawiesinie, a także że nie zachodzą interakcje pomiędzy nimi i nie ma miejsca zasłanianie mniejszych cząstek przez większe.

Materiały i metody

W eksperymencie wykorzystano osiem różnych litologicznie rodzajów osadów (jedna próbka pyłu, pięć – glin i dwie – piasków). Wszystkie one były bezwęglanowe i nie zawierały próchnicy glebowej.

Przed analizami próbki zostały rozkwartowane i przesiane przez sito o średnicy oczek 1 mm. Do metody sitowej (na sucho i na mokro) użyto zestawu kalibrowanych sit analitycznych firmy Fritsch o wielkościach oczek: 0,5 mm; 0,25 mm; 0,1 mm; 0,063 mm; 0,05 mm. Metoda sitowa na sucho polegała na wytrząsaniu (amplituda 1 mm) w kolum-

nie sit, na wytrząsarce przez pół godziny 40 – 80 g osadu. Po tym czasie wytrząsano ręcznie i przy pomocy pędzelka osad z kolejnych sit do momentu, gdy efektywność takiego przesiewania drastycznie spadła. Wszystkie osady pozostałe na sitach, a także odsiane frakcje pyłu i ilu ważono i przeliczono na wartości procentowe. Metoda sitowa na mokro polegała na wytrząsaniu (amplituda ok. 0,5 mm) w kolumnie sit, na wytrząsarce, przez ok. 10 min., pod strumieniem wody, osadów użytych wcześniej do analizy areometrycznej. Po tym czasie przesiewano ręcznie, przy pomocy pędzelka, pod strumieniem wody osady z kolejnych sit. Wodę z przesianymi wtedy cząstkami łapano do parowniczkii i wlewano do następnego sita o mniejszych oczkach. Wszystkie pozostające na sitach osady suszono w 105°C , ważono i przeliczano na wartości procentowe. Frakcje $>0,05 \text{ mm}$ obliczono odejmując od 100% wartości większych frakcji.

Analizę areometryczną Casagrande'a w modyfikacji Prószyńskiego wykonano, zgodnie z powszechnie stosowaną metodyką, w dwóch powtórzeniach. Preparatyka wstępna objęła rozbicie agregatów poprzez 30 minutowe gotowanie próbek z dodatkiem 1,5 g bezwodnego węglanu sodu.

Analizę dyfrakcji laserowej (4 powtórzenia) wykonano na laserowym mierniku cząstek Analysette 22, niemieckiej firmy Fritsch. Posiada on laser helowo-neonowy o mocy $<5 \text{ mW}$ i długości fali $0,6328 \mu\text{m}$. Analizy wykonano w zakresie $1,6\text{--}1250 \mu\text{m}$ i w dużej rozdzielczości (310 kanałów pomiarowych). Obliczenia rozkładu uziarnienia dokonano przy pomocy teorii Fraunhofera. Aby zapobiegać koagulacji cząstek próbki analizowano w 0,1% roztworze pirofosforanu sodu. Przed pomiarem próbki poddane były przez 5 minut działaniu ultradźwięków. Postępowanie przy analizie jest opisane przez Kaszę (1992).

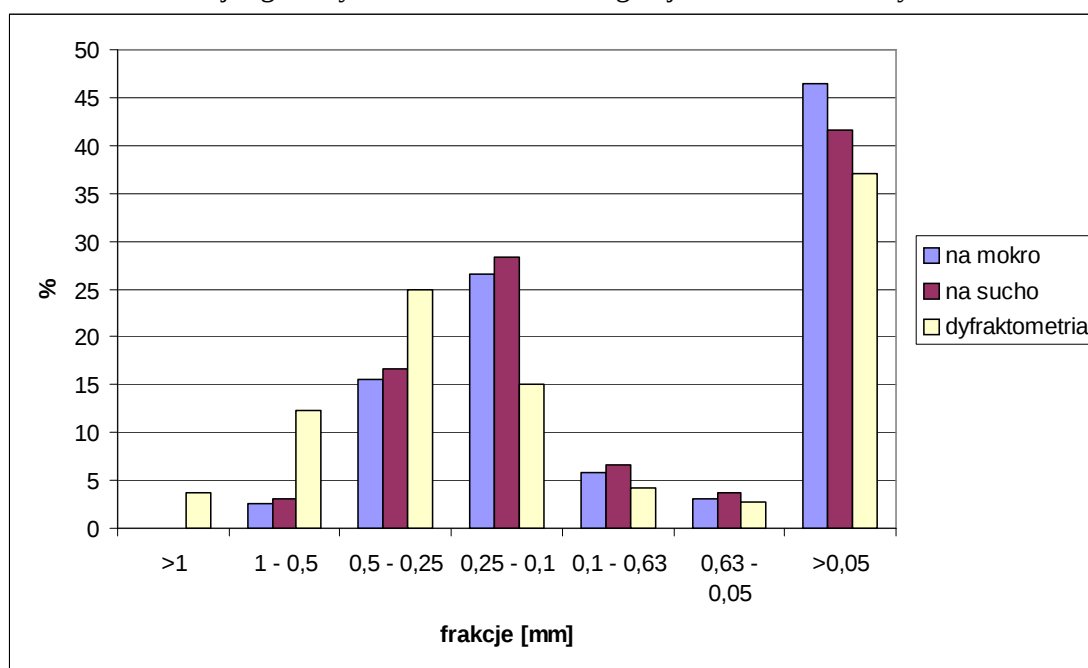
Relacje pomiędzy wynikami odzwierciedlają osie główne zredukowane o równaniu $y=a\cdot x+b$. Współczynnik determinacji R^2 ukazuje procent zmienności wyników tłumaczony przez proponowane równania, współczynnik P opisuje istotność statystyki, $P<0,05$ – statystyka jest istotna z 95 % przedziałem ufności.

Wyniki i dyskusja

Stwierdzono bardzo wyraźną, statystycznie istotną, zależność pomiędzy wynikami analiz sitowych, zaproponowane osie główne zredukowane do przeliczania wyników jednej metody na drugą tłumaczą 96 do 99 % zmienności (tab. 1.). Wyniki

uzyskane dla frakcji 1 – 0,05 mm podczas przesiewania na sucho są wyższe o ok. 1 – 10% od odpowiadających im wyników przesiewania na mokro. Dla frakcji <0,05 mm zachodzi odwrotna prawidłowość dochodząca do 6% różnicy. Są dwa powody różnicy pomiędzy wynikami badanych metod. Ok. 2/3 różnicy wynika z faktu, że na pozostałych na sicie ziarnach piasku zawsze pozostanie pewna niewielka ilość pyłu i łu, która sztucznie zawyży wagę tej frakcji. Pozostała część różnicy jest efektem rozpylania najdrobniejszych frakcji podczas przesiewania na sucho, a zatem ich trzeenia. Daje to w efekcie mniejszą ilość ziaren <0,05 mm, co automatycznie sztucznie zwiększa procentowe ilości frakcji grubszych. Wraz ze

zmniejszaniem się ilości piasku zmniejszają się również straty frakcji drobnych podczas przesiewania na sucho, z prawie 6 % dla piasków luźnych do ponad 3 % dla utworów bezpiaskowych. Zależności pomiędzy wynikami analiz sitowych i analizy areometrycznej są bardziej złożone, choć wciąż zachowują bardzo dużą zależność (tab. 2.). Analizy sitowe dają niższe wyniki dla mniej licznych frakcji, zawyżając w stosunku do analizy areometrycznej ilość frakcji przeważających. Różnice te zwykle są bardzo nieduże i na ogół nie przekraczają 5% (w wyjątkowych przypadkach osiągają ok. 10%). Warto zwrócić uwagę na wysoką korelację pomiędzy wynikami obu metod dla piasku, co sugeruje, że dokładnie wykonana metoda areome



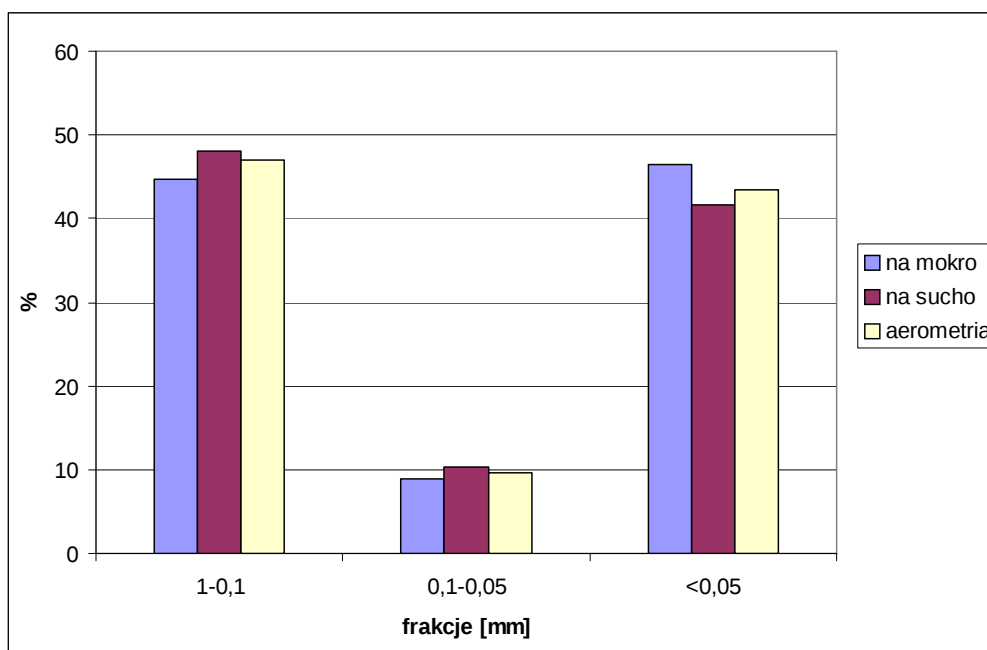
Ryc. 1. Porównanie rozkładu granulometrycznego otrzymanego metodą sitową na sucho, sitową na mokro i dyfrakcji laserowej dla wszystkich badanych prób – wartości średnie

Fig. 1. Comparison of grain size distribution measured with different methods – mean values for all tested samples; na mokro – by wet sieve method, na sucho – by dry sieve method, dyfraktometria – by laser diffraction method

Tabela 1. Współczynniki opisujące relację pomiędzy wynikami analizy sitowej na mokro (x) i analizy sitowej na sucho (y)

Table 1. Coefficients which characterize relation between wet sieve method results (x) and dry sieve method results (y); R^2 – coefficient of determination

Fracje	równanie	R^2	P
1 - 0,5	$y = 1,16 x + 0,11$	98,01	0,0000
0,5 - 0,25	$y = 1,06 x + 0,13$	99,20	0,0000
0,25 - 0,1	$y = 1,03 x + 1,21$	99,29	0,0000
0,1 - 0,063	$y = 1,16 x - 0,08$	98,65	0,0000
0,063 - 0,05	$y = 1,09 x + 0,28$	96,05	0,0000
<0,05	$y = 1,03 x - 6,09$	98,74	0,0000



Ryc. 2. Porównanie rozkładu granulometrycznego otrzymanego metodą sitową na sucho, sitową na mokro i areometryczną dla wszystkich badanych prób – wartości średnie

Fig. 2. Comparison of grain size distribution measured with different methods – mean values for all tested samples; na mokro – by wet sieve method, na sucho – by dry sieve method, aerometria – by areometric method

Tabela 2. Współczynniki opisujące relację pomiędzy wynikami analiz sitowych (x) i analizy areometrycznej (y)

Table 2. Coefficients which characterize relation between wet sieve method and dry sieve method results (x) and areometric method results (y); R^2 – coefficient of determination

analiza	Fracje	równanie	R^2	P
na mokro	1 -0,1	$y = 0,94 x + 5,03$	99,94	0,0000
	0,1 - 0,05	$y = 0,96 x + 1,16$	95,20	0,0002
	<0,05	$y = 0,90 x + 1,54$	99,83	0,0000
na sucho	1 -0,1	$y = 0,93 x + 2,59$	99,32	0,0000
	0,1 - 0,05	$y = 0,88 x + 0,41$	91,77	0,0007
	<0,05	$y = 0,91 x + 5,13$	98,27	0,0000

tryczna nie jest mniej precyzyjna od metody kombinowanej (łączącej wyniki metody areometrycznej i sitowej).

Analiza laserowa wykazuje tendencję do zawyżania ilości frakcji $>0,25$ mm (w małych ilościach również dla frakcji $0,25 - 0,1$ mm) kosztem frakcji drobniejszych w porównaniu do analiz sitowych. Dla mniejszych cząstek zachodzi odwrotna prawidłowość (tab. 3.). Różnice te, zwykle kilkuprocentowe, nierzadko przekraczają 20%. Dodatkowo obliczane równania prostych miały niski współczynnik determinacji ($R^2=59-95$), zaś dla frakcji $1 - 0,5$ mm okazały się nieistotne statystycznie. Sugeruje to, że wyliczone wzory mogą służyć jedynie do orientacyjnego przeliczania wyników tych metod pomiędzy sobą. Podobne

problemy zachodzą przy porównywaniu wyników metody dyfrakcji laserowej z wynikami metody areometrycznej (Płoskonka, 2009).

Różnice w wynikach są przede wszystkim efektem wykorzystania w różnych metodach innych wielkości fizycznych oraz niecałkowitego spełniania założeń teoretycznych omawianych metod. Najważniejszym powodem różnic w otrzymywanych wynikach pomiędzy metodami sitowymi a sedymentacyjnymi i dyfrakcji laserowej wydaje się kształt cząstek. W przypadku, gdy odbiega on znacznie od kulistego metoda areometryczna „widzi” cząstki jako mniejsze niż inne metody, zaś metoda dyfrakcji laserowej średnio „widzi” je jako większe niż w przypadku pozosta-

Tabela 3. Współczynniki opisujące relację pomiędzy wynikami analiz sitowych (x) i analizy laserowej (y)
Table 3. Coefficients which characterize relation between wet sieve method and dry sieve method results (x) and laser diffraction method results (y); R^2 – coefficient of determination

analiza	Fracje	równanie	R^2	P
na mokro	1 - 0,5	-	-	>0,05
	0,5 - 0,25	$y = 1,35 x + 2,36$	69,91	0,0191
	0,25 - 0,1	$y = 0,44 x + 2,77$	69,69	0,0194
	0,1 - 0,063	$y = 0,84 x - 0,55$	75,94	0,0106
	0,063 - 0,05	$y = 0,90 x - 0,02$	65,85	0,0267
	<0,05	$y = 1,02 x - 10,77$	89,85	0,0012
na sucho	1 - 0,5	-	-	>0,05
	0,5 - 0,25	$y = 1,18 x + 3,66$	70,09	0,0188
	0,25 - 0,1	$y = 0,41 x + 3,20$	75,92	0,0106
	0,1 - 0,063	$y = 0,78 x - 1,15$	66,63	0,0251
	0,063 - 0,05	$y = 0,84 x - 0,33$	58,94	0,0439
	<0,05	$y = 0,96 x - 2,57$	95,53	0,0001

łych metod (Kornet, Vandenberghe, 1997; Beuselinck i in., 1998).

Choć zastosowane metody mają za zadanie minimalizować efekt takich czynników jak różna gęstość badanych cząstek, gęstość i temperatura ośrodka, brak oddziaływań pomiędzy cząstkami nie można wykluczyć pewnego wpływu tych czynników na wyniki. Można się spodziewać, że również różny sposób przygotowania próbek do analiz odegra pewną rolę w różnicowaniu wyników (Seul, 2007). Niebagatelny wpływ na słabą korelację metody dyfrakcji laserowej z innymi metodami ma niewielka naważka osadu (ok. 1 g) używana do analizy, co bardzo utrudnia zachowanie jej reprezentatywności względem całości osadu. Podczas analizy dyfrakcji laserowej możemy również „gubić” niewielką ilość najmniejszego iłu, którego pierścienie dyfrakcyjne znajdują się już poza detektorem urządzenia (Buuraman i in., 1997).

Dodatkowym problemem z którym należy się liczyć są różne granice frakcji w różnych klasyfikacjach, co może wprowadzać pewien zamęt przy interpretacji wyników (Szmańda, Krzemień, 2008). Należy również pamiętać by nie porównywać ze sobą bezpośrednio współczynników (np. Folka i Warda) wyliczonych z rozkładów uziarnienia otrzymanych różnymi metodami. Różnią się one od siebie i mimo pewnych prawidłowości, odznaczają się znaczną zmiennością (Nicieja, 1996). Wnioskowanie o cechach paleośrodowiska na podstawie krzywej uziarnienia uzyskanej przy pomocy metody dyfrakcji laserowej i wyliczonych z niej

współczynników może prowadzić do błędnych wniosków.

Zaprezentowane równania do przeliczania wyników poszczególnych metod pomiędzy sobą są przeważnie mniej pewne i tłumaczą mniejszy procent zmienności dla frakcji 0,1 – 0,05 mm. Wynika to najprawdopodobniej z stosunkowo małej ilości tej frakcji. Może to być efektem zarówno doboru badanych osadów, jak i położenia tej frakcji poniżej występującej w przyrodzie z większą częstotliwością klasą ziarn klastycznych piasku (Pettijohn, 1957).

Wnioski

Przeprowadzony eksperyment pokazuje, że jest możliwe w miarę dokładne przeliczanie wyników metod sitowych i metody areometrycznej pomiędzy sobą. Porównanie wyników metody dyfrakcji laserowej z metodami sitowymi (podobnie jak z metodą areometryczną) może być jedynie orientacyjne. Potrzebne są dalsze badania w danym temacie. Rozpatrując to zagadnienie należy zwrócić uwagę na fizyczne założenia i ograniczenia danych metod, różne sposoby preparowania próbki, zagadnienie reprezentatywności próbki, różnice litologiczne oraz wzajemne relacje pomiędzy frakcjami. Nie wydaje się, by udało się opracować uniwersalne wzory do przeliczeń wyników poszczególnych metod, które nie uwzględniałyby wyżej wymienionych elementów.

Literatura

- Beuselinck L., Govers G., Poesen J., Degraer G., Froyen L., 1998. Grain-size analysis by laser diffractometry: comparison with the sieve-pipette method. *Catena*, 32: 193-208.
- Buurman P., Pape Th., Muggler C.C., 1997. Laser grain-size determination in soil genetic studies. 1. Practical problems. *Soil Science*, 162, 3: 211-218.
- Dębicki R., Klimowicz Z., Zgłobicki W., 2002. Porównanie rozkładu granulometrycznego oznaczonego metoda areometryczną i laserową na przykładzie gleb lessowych. *Acta Agrophysica*, 56: 95-103.
- Issmer K., 2000. Późnoplejstocénskie osady lessowe na seriach glacialnych północnozachodniej Polski oraz ich paleogeograficzne znaczenie. UAM, Poznań.
- Kasza I., 1992. Laserowa metoda określania składu granulometrycznego utworów gliniastych, pylastych i ilastych. *Przegląd Geologiczny*, 5: 323-325.
- Kordek J., 2002. Mikromerytyka – właściwości drobnych ziaren. *Materiały Ceramiczne*, 4: 138-143.
- Kornet M., Vandenberghe J., 1997. Comparison of laser grain size analysis with pipette and sieve analysis: a solution for the underestimation of the clay fraction. *Sedimentology*, 44: 523-535.
- Loizeau J.-L., Arbouille D., Santiago S., Vernet J.-P., 1994. Evaluation of a wide range laser diffraction grain size analyser for use with sediments. *Sedimentology*, 41: 353-361.
- Merta T., 1991. A new, universal method of thin-section – to – sieve transformation of granulometric data. *Geologica Polonica*, 41, 1-2: 117-150.
- Myślińska E., 1998. Laboratoryjne badania gruntów. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa.
- Nicieja M., 1996. Analiza uziarnienia osadów drobnoziarnistych w świetle wybranych metod. [W:] A. Kostrzewski (red.), *Geneza, litologia i stratygrafia utworów czwartorzędowych*. Wyd. PTPN, Poznań: 199-217.
- Pettijohn F.J., 1957. *Sedimentary rocks*. Haper and Bras, New York.
- Płoskonka D., 2009. Porównanie wyników metody areometrycznej i metody dyfrakcji laserowej przy analizie różnych utworów. [W:] A. Kostrzewski, R. Paluszkiwicz (red.), *Geneza, litologia i stratygrafia utworów czwartorzędowych*. Tom V. Wyd. Nauk. UAM, Poznań.
- Ramaswamy V., Rao P.S., 2006. Grain Size Analysis of Sediments from the Northern Andaman Sea: Comparison of Laser Diffraction and Sieve-Pipette Techniques. *Journal of Coastal Research*, 22, 4: 1000-1009.
- Ryżak M., Walczak R.T., Niewczas J., 2004. Porównanie rozkładu granulometrycznego cząstek glebowych metodą dyfrakcji laserowej i metodą sedymentacyjną. *Acta Agrophysica*, 4, 2: 509-518.
- Seul C., 2007. Sedimentary environments of the Late Pleistocene terrestrial deposits at Kolodiv (East Carpatian Foreland, Ukraine) in the light of elementary and aggregate grain-size composition. *Geological Quarterly*, 51, 2: 179-184.
- Szmańda J.B., Krzemień K., 2008. Uwagi na temat wybranych klasyfikacji frakcjonalnych osadów klastycznych – problem różnic w przedziałach klasowych i nazewnictwie. *Landform Analysis*, 9: 381-384.
- Sztaba K., 1993. *Przesiewanie*. Śląskie Wydawnictwo Techniczne, Katowice.

